

## 論文 曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリートパネルのせん断性状

伊藤 正通\*1・金久保 利之\*2

**要旨:** 面内曲げモーメントおよびせん断力を受ける RC パネルの力学性状を検討することを目的とし、曲げモーメントが作用する場合の RC パネルのせん断性状評価方法を Collins 等の Modified Compression-Field Theory をもとに新しく提案した。平板二軸加力装置により、曲げモーメントとせん断力の比率を変化させた加力実験を行い、提案方法の適合性についても検討を加えた。その結果、提案方法により得られたせん断応力-せん断歪関係、曲げモーメント-曲率関係の解析結果は、実験結果とよい対応を示した。

**キーワード:** パネル, 二軸性状, 曲げモーメント, 曲げせん断性状

## 1.はじめに

鉄筋コンクリート (以下 RC) 部材のせん断性状に関する研究は、現在までに数多くなされており、例えばアーチ・トラスモデルに代表させるようなマクロモデルを用いた解析手法も種々提案されている<sup>1)</sup>。マクロモデルでは一般に曲げモーメントの作用は無視され、コンクリートの有効圧縮強度等、理想的に部材腹部にせん断力や軸力のみが作用した場合の力の釣合条件を考慮している。

一方、RC のせん断性状を検討する方法として Collins 等による Modified Compression-Field Theory<sup>2)</sup> (以下 MCFT) が挙げられる。MCFT では、繰返し計算を必要とするが、力の平衡条件とともに変形適合条件も考慮されるため、力と変形の関係や種々の破壊モードを求めることができる。しかし、MCFT では出発点が RC パネルのため壁やシェル要素には適合させやすいが、柱や梁等の一般の部材への拡張は難しい。現在、一般の部材への拡張を目的として曲げモーメントや軸力による軸方向の歪の適合条件を考慮したせん断評価法も提案されている<sup>3),4)</sup>。

本研究では一般の RC 部材のせん断性状評価に資するために、面内曲げモーメントおよびせん断力を受ける RC パネルの力学性状検討方法を、新

たに MCFT を基にして提案する。さらに平板二軸加力装置により曲げモーメントとせん断力の比率を変化させた加力実験を行い、提案方法の適合性について検討を行う。

なお通常の RC ではせん断ひび割れ面での骨材のかみ合いによるせん断応力伝達を考慮する必要があるが、本報では簡略化のためモルタルを用いて実験を行い、解析においても骨材のかみ合いは無視している。

## 2.面内曲げモーメントとせん断力を受ける要素の解析方法

## 2.1 解析方法の概要

本研究では図-1 に示すようなパネル要素に、面内の純せん断応力と純曲げモーメントが作用する場合の解析方法を検討する。MCFT では、パネル要素に一樣に圧縮力や引張力の外力が作用する場合の純せん断応力場 (二軸複合応力場) の解析が可能である。そこで本研究では図-2 に示すようにパネル要素をさらに y 方向に分割し、外力としての曲げモーメントが各小要素に軸方向力として作用すると考え、各小要素について MCFT による解析を行うことによって、トータルとして純せん断応力と純曲げモーメント下の複合応力場での解析

\*1 筑波大学大学院 (正会員)

\*2 筑波大学講師 機能工学系 博士 (工学) (正会員)

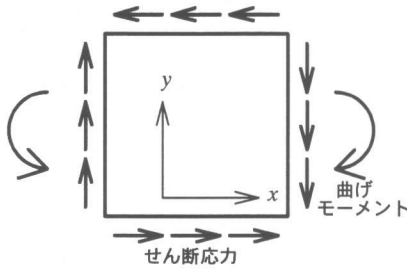


図-1 要素に作用する外力

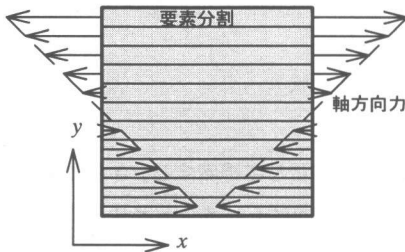


図-2 曲げ加力分布

を行う。計算の簡略化のため各小要素の軸方向力は  $y$  方向に対して直線分布とし、それらの合力が目標とした純曲げモーメントと等しくなるように解析を行う。軸方向力を直線分布とするため、曲げに対しての平面保持の仮定は成り立たない。また MCFT の解析では、対象を全て平均化して行うので、鉄筋は各小要素に均等に含まれるものと考えられる。また各小要素に対して主歪、せん断歪等が得られるため、最終的な出力は各小要素で平均化する等の作業が必要である。

## 2.2 解析手順

本節では、具体的な解析手順を述べる。

まず、目標とする純曲げモーメントを設定し、要素分割に応じてそれらの要素に作用する軸方向力を、設定した曲げモーメントと等しくなるに決定する。曲げモーメントは一定値でも可能であるが、本研究では後述の実験と合致するように純せん断力と比例して増大するものとし、その比例定数を変数としている。また要素分割数は 100 とした。

次に分割された各要素に対して MCFT による繰

返し逐一計算を行う。各要素の歪を図-3 のように定め、引張主歪 ( $\epsilon_1$ )、 $x$  方向と圧縮主歪 ( $\epsilon_2$ ) とのなす角 ( $\theta$ )、各鉄筋の平均応力 ( $f_{ri}$ ) を適当に決める。MCFT におけるコンクリートの引張応力-引張歪関係 (図-4) から、 $\epsilon_1$  に対応する主引張応力 ( $f_{c1}$ ) を求める。続いて力の釣合い関係から、せん断応力 ( $\tau_{xy}$ ) を求める。 $f_{c1}$ 、 $\tau_{xy}$  より、コンクリートについてのモールの応力円から、主圧縮応力 ( $f_{c2}$ ) を求める。また、コンクリートの圧縮強度 ( $f_{c2max}$ ) を  $\epsilon_1$  から求める。なおこの関係式については MCFT をモルタルの場合について改良を加えたもの<sup>5)</sup>を用いた。 $f_{c2}$  が、 $f_{c2max}$  より大きければ、コンクリートは圧壊したということがいえる。コンクリートの圧縮応力-圧縮歪関係 (図-5) から、圧縮主歪 ( $\epsilon_2$ ) を逆算し、その後モールの歪円から  $y$  方向の歪 ( $\epsilon_y$ ) を求める。

さらに各鉄筋における力の釣合いから、各鉄筋の平均応力を求める。ここで求めた各鉄筋の平均応力と、最初に適当に決めた各鉄筋の平均応力が一致するまで、最初に決める各鉄筋の平均応力の値を入れ替えて、以上の手順を繰り返す。曲げモーメントによって定めた各要素の軸方向外力が、解析によって得られた  $x$  方向の外力 ( $f_x$ ) と等しく

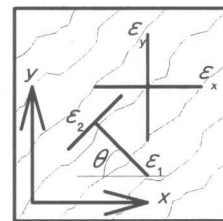


図-3 要素内の歪

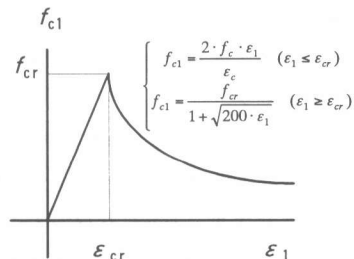


図-4 コンクリートの引張応力-歪関係

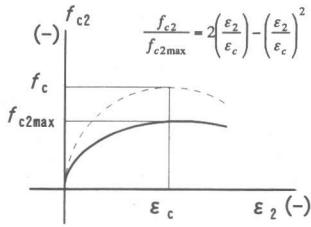


図-5 コンクリートの圧縮応力-歪関係

なるまで、 $\theta$ の値を入れ替えて計算する。最後にモールの歪円からせん断歪 ( $\tau_{xy}$ ) を求める。以上の手順より、最初に仮定した  $\varepsilon_1$  に対応した  $\tau_{xy}$  と  $\gamma_{xy}$  が求められる。また各要素間での  $\varepsilon_x$  の差を求めることにより、パネルの曲率 ( $\phi_y$ ) が算出される。

### 2.3 解析結果の例

後述する試験体 SD シリーズを例に挙げ解析結果の一例を示す。SD シリーズ試験体は縦方向 ( $x$  方向) の補強筋が横方向 ( $y$  方向) の補強筋量の倍量配筋してある試験体である。せん断応力 ( $\tau_{xy}$ ) - せん断歪 ( $\gamma_{xy}$ ) 関係および曲げモーメント ( $m_y = M/tD^2$ ) - 曲率 ( $\phi_y$ ) 関係を、図-6 および図-7 に示す。せん断応力-せん断歪関係は全分割要素数の中央部 2/3 の領域端で得られた値の平均、曲率は同中央部 2/3 領域端で得られた歪値から算出したものであり、後述試験体での変位計設置位置と対応している。せん断応力と曲げモーメントの比率 ( $\tau_{xy} : m_y$ , 以下せん断曲げ比と略記) は 1 : 0.089 (1 : 0.5 と表記), 1 : 0.178 (1 : 1.0 と表記), 1 : 0.356 (1 : 2.0 と表記) の場合である。せ

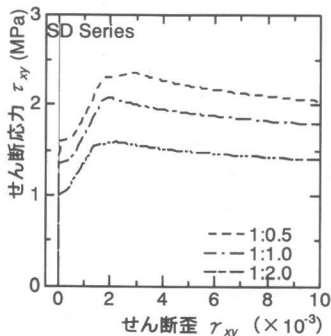


図-6 せん断応力-せん断歪関係

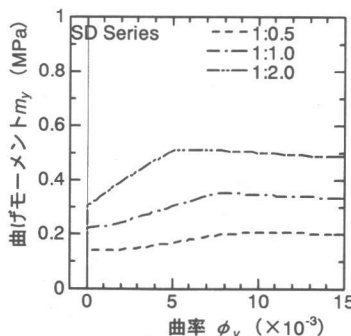


図-7 曲げモーメント-曲率関係

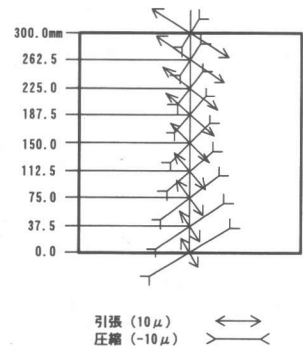


図-8 主歪分布の例(M5-SD10)

ん断応力-せん断歪関係に着目すると曲げモーメントの比率が大きくなるほど同一歪時のせん断応力は小さくなる。逆に曲げモーメント-曲率関係では曲げモーメントが大きくなれば当然同一曲率時の曲げモーメントが大きくなっている。これは、曲げモーメントの比率が大きくなるとせん断歪が同一でも、主に引張力を受ける要素のひび割れや補強筋の降伏が早期に発生するためである。

前述 3 種類のうち、せん断曲げ比が 1:1.0 の試験体について、最外縁コンクリートひび割れ時の各要素の主歪分布を図-8 に示す。 $x$  軸と  $\varepsilon_1$  とのなす角度は中心部で  $45^\circ$  となり、引張側では、端部に行くほど増加し、一方圧縮側では減少していく傾向がみられた。

### 3. 面内曲げモーメントとせん断力を受けるパネルの実験

本研究では前章で提案した解析方法の適合性について検討するために、実際に RC パネルの純曲げ純せん断加力実験を行い、得られた実験結果を解析結果と比較した。

#### 3.1 試験体

試験体は  $300 \times 300 \times 25\text{mm}$  の RC パネルで、加力装置固定用孔を 24 カ所、変位計固定用ボルトを 4 カ所に設けた。図-9 に試験体図を示す。実験パラメータは縦筋、横筋の配筋量 (D4 シングル @75mm, D4 ダブル@75mm) およびせん断応力に対する曲げモーメントの割合とし、これらのパラメータを組み合わせた 11 体の試験体で実験を行

表-1 試験体一覧

試験体名	使用モルタル	使用鉄筋	配筋 (75mm ピッチ)		せん断曲げ比	
			横 (y 方向)	縦 (x 方向)	応力比 ( $\tau_{xy} : m_y$ )	基準ジャッキの加力比 ( $P_1 : P_2$ )
M5-SS00	M5(1)	D4(1)	シングル ( $\rho_y=0.00502$ )	シングル ( $\rho_x=0.00502$ )	1 : 0.000	1 : 0.0
M5-SS02	M5(2)	D4(2)			1 : 0.036	1 : 0.2
M5-SS05	M5(1)	D4(1)			1 : 0.089	1 : 0.5
M5-SS10					1 : 0.178	1 : 1.0
M5-SS20	M5(2)	D4(2)			1 : 0.356	1 : 2.0
M5-SS50				1 : 0.889	1 : 5.0	
M5-SD05				ダブル ( $\rho_x=0.01005$ )	1 : 0.089	1 : 0.5
M5-SD10					1 : 0.178	1 : 1.0
M5-SD20					1 : 0.356	1 : 2.0
M5-DD05	ダブル ( $\rho_y=0.01005$ )	ダブル ( $\rho_x=0.01005$ )		1 : 0.089	1 : 0.5	
M5-DD10			1 : 0.178	1 : 1.0		
M5-DD20			1 : 0.356	1 : 2.0		

った。表-1 に試験体の一覧を示す。

### 3.2 使用材料

実験に用いたモルタルは目標強度を 50MPa としたプレミックスモルタルを使用した。モルタルの力学的特性を表-2 に示す。また異形鉄筋 D4 の力学的特性を表-3 に示す。

### 3.3 加力・計測方法

加力には 24 本の油圧ジャッキを使用し、圧縮力および引張力の油圧源をそれぞれ 3 系統に分け、目標とする二軸複合応力場を与えた。例として、せん断曲げ比が応力比で 1:0.089、すなわち基準ジャッキの加力比が 1:0.5 の場合の加力図を図-10 に示す。本実験における計測項目はジャッキの荷重値、試験体標点間の変形量、主な位置での鉄筋歪である。図-11 に変位測定位置を示す。変位計は試験体の表裏に設置し、両面の各辺に対し平行な位置 (辺から 50mm) に 4 箇所、引張方向の対角線上に 1 箇所の計 5 箇所に設置した。

表-2 モルタルの力学的特性

モルタル種類	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
M5(1)	42.7	3.49	21.7
M5(2)	36.6	2.40	19.2

注)加力時材齢は M5(1)が 47~65 日, M5(2)が 28~30 日である。

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 (GPa)
D4(1)	228	285	191
D4(2)	299	395	185

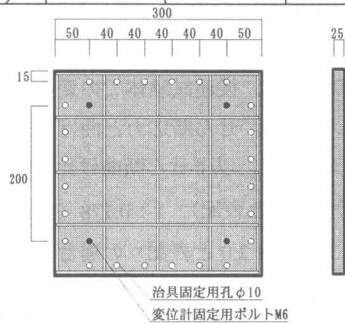


図-9 試験体図

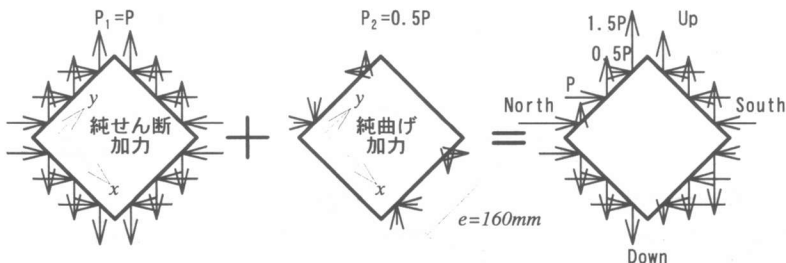


図-10 加力方法 (せん断曲げ比 1 : 0.5 の場合)

表-4 実験結果

試験体名	最大せん断応力 (MPa)			最大曲げモーメント (MPa)			破壊形式*
	実験結果	解析結果	実験/解析	実験結果	解析結果	実験/解析	
M5-SS00	1.51	2.03	0.74				F→C
M5-SS02	1.77	1.94	0.91	0.063	0.069	0.91	F
M5-SS05	1.49	1.66	0.90	0.133	0.148	0.90	F
M5-SS10	1.35	1.40	0.96	0.239	0.248	0.96	F
M5-SS20	1.17	1.05	1.11	0.417	0.372	1.12	F
M5-SS50	0.46	0.56	0.82	0.406	0.499	0.81	E
M5-SD05	2.31	2.36	0.98	0.204	0.210	0.97	F
M5-SD10	1.93	2.09	0.92	0.342	0.371	0.92	F
M5-SD20	1.75	1.59	1.10	0.622	0.567	1.10	F
M5-DD05	2.90	2.96	0.98	0.258	0.263	0.98	F
M5-DD10	2.66	2.44	1.09	0.476	0.435	1.09	F
M5-DD20	2.33	1.72	1.35	0.827	0.613	1.35	F

\*F: 鉄筋の引張降伏 C: コンクリートの圧縮破壊 E: 端部破壊

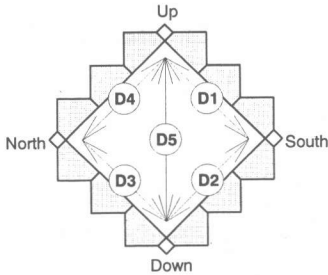


図-11 変位測定位置

### 3.4 実験結果

実験で得られたデータから次式を用いてパネルのせん断応力, 曲げモーメント, せん断歪, 曲率を算出した。

$$\tau_{xy} = 3\sqrt{2} \cdot P_1 / (t \cdot b) \quad (1)$$

$$m_y = \sqrt{2} \cdot e \cdot P_2 / (t \cdot D^2) \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \left\{ \begin{aligned} & \min(\varepsilon_{disp1}, \varepsilon_{disp3}) \\ & - \min(\varepsilon_{disp2}, \varepsilon_{disp4}) \end{aligned} \right\}^2 + \varepsilon_{disp5}^2 \quad (3)$$

$$\phi_y = (\varepsilon_{disp1} - \varepsilon_{disp3}) / l \quad (4)$$

ここで,

$\tau_{xy}$ : せん断応力

$m_y$ : 曲げモーメント (応力)

$\gamma_{xy}$ : せん断歪

$\phi_y$ : 曲率

$P_1$ : 純せん断加力基準荷重値

$P_2$ : 純曲げ加力基準荷重値

$t$ : パネルの厚

$b$ : パネルの幅

$\varepsilon_{dispi}$ : 変位計による測定歪 (図-11 と対応)

$e$ : 曲げ加力偏心量

$l$ : 標点間距離 (=200mm)

$D$ : パネルの全せい

実験結果の例として縦筋, 横筋をシングル配筋とした5体の試験体 (SS シリーズ) のせん断応力-せん断歪関係を図-12 に, 曲げモーメント-曲率関係を図-13 にそれぞれ示す。ほぼすべての試験体においてせん断曲げ比が大きくなるほどにせん断耐力が減少する傾向がみられた。表-4 に実験結果の一覧 (最大せん断応力, 最大曲げモーメント, 最終破壊形式) を示す。試験体の最終破壊形式は鉄筋の引張降伏 (F) とコンクリートの圧縮破壊 (C), そして端部破壊 (加力途中の掴み部での破壊) (E) の3種がみられた。

### 3.5 解析結果と実験結果の比較

実験結果と解析結果の比較の例として横筋をシングル, 縦筋をダブル配筋にした試験体 (SD シリーズ) のせん断応力-せん断歪関係を図-14 に, 曲げモーメント-曲率関係を図-15 にそれぞれ示す。解析結果は図-6 および図-7 の場合と同様に変位計測区域 200mm での各関係を平均化したものである。各関係ともに曲線の形状, 最大せん断応力, トリリニア型グラフの第二直線部分の傾き等において実験結果と解析結果はおおよそ類似しており, 提案された解析法の妥当性が伺える。最大せん断応力および最大曲げモーメントに関して,

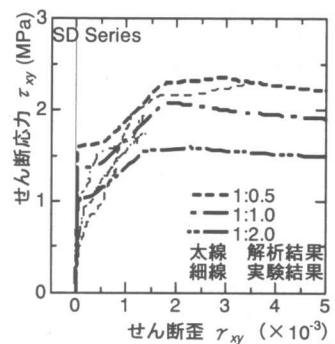
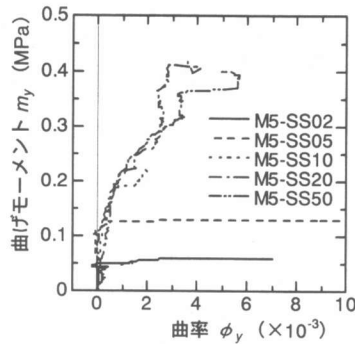
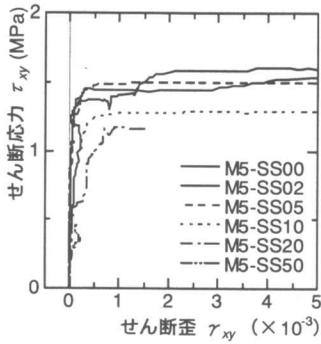


図-12 せん断応力-せん断歪関係 図-13 曲げモーメント-曲率関係 図-14 せん断応力-せん断歪関係

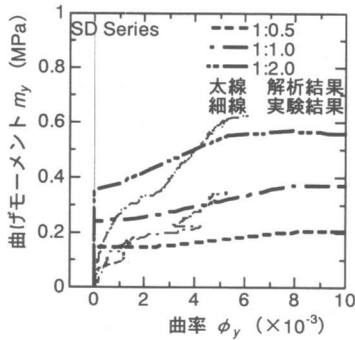


図-15 曲げモーメント-曲率関係

各試験体の解析値および実験と解析の比較値を表-4に併せて示す。実験結果の解析結果に対する比は、全試験体平均で最大せん断応力では0.99、最大曲げモーメントでは1.01であり、ほぼ全ての試験体で実験値に類似した解析値を得ることができた。

#### 4.まとめ

本研究では、一般のRC部材のせん断性状評価に資するために、面内曲げモーメントおよびせん断力を受けるRCパネルの力学性状検討方法を、新たにCollins等のMCFTを基に提案した。本方法は、曲げモーメントを等価な軸方向外力としてパネルに作用させ、力の平衡条件および変形適合条件によりパネルの力学性状を得るものである。

さらに平板二軸加力装置により曲げモーメントと純せん断力の比率を変化させた加力実験を行い、提案方法によりおおむね実験結果を表現できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 例えば日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説 pp.142-162, 1997.7
- 2) Vecchio, F.J. and Collins, M.P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, pp.219-231, March-April 1986
- 3) Collins, M.P., Mitchell, D., Adebar, P., Vecchio, F.J. : A General Shear Design Method, ACI Structural Journal, Vol.93, No.1, pp.36-45, Jan.-Feb., 1996
- 4) Rahal, K.N. : Shear Strength of Reinforced Concrete : Part II - Beams Subjected to Shear, Bending Moment, and Axial Load, ACI Structural Journal, Vol.97, No.2, pp.219-224, March-April, 2000
- 5) 伊藤正通, 加藤祐介, 金久保利之: コンクリートの強度および種類がRCパネルのせん断性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 第22巻, 第3号, pp.157-162, 2000.6